


学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 200331035

UDC _____



硕 士 学 位 论 文

基于 T-S 模型的模糊广义预测
控制方法研究及应用Research & Application of Fuzzy Generalized Predictive
Control Based on T-S Model

曾 海 莹

指导教师姓名: 杨晓松 教授

刘瞰东 讲师

厦门大学学位论文原创性声明

论文提交日期: 2006 年 5 月

论文答辩时间: 2006 年 6 月

兹呈交的学位论文,是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果,均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

答辩委员会主席: 彭侠夫评 阅 人: 吉国力等

2006 年 6 月

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

随着科学技术和生产力的不断发展,在实际工业过程中受控对象越来越复杂,表现为如下一些特征:多输入多输出、时变性、藕合、时滞、非线性、不确定性、信息量少、高性能指标等。诸如此类的复杂系统,由于无法建立系统的精确数学模型,从而使得传统控制理论很难给出一个较好的控制效果,甚至不能控制。本文针对热工过程中的非线性、多变量、大时滞等特点,致力于从非线性角度研究预测控制算法在热工过程中的应用。本文的主要内容是研究基于 T-S 模糊模型的非线性系统辨识算法,并在此基础上研究非线性系统的模糊预测控制问题,并且把基于 T-S 模型的广义预测控制算法应用于糖厂锅炉水位系统的控制。

具体包括以下几个方面:

1、针对复杂非线性动态系统的模糊建模问题,本文基于 T-S 模型提出一种自组织模糊辨识算法。改进后的算法简化了前提结构辨识的过程,并使前提参数辨识和结论参数辨识同时完成,极大的减少了参数辨识和结构辨识的计算量,能够保证在线辨识的要求。大量的仿真结果表明该算法具有收敛速度快、辨识精度高、稳定性好,便于工程应用。

2、介绍了 T-S 模糊模型和 GPC 基本原理的基础上,将基于 T-S 模型的 GPC 归纳为三种算法,从理论上对这三种算法进行了详细地推导,并通过仿真研究比较了三种算法的控制性能和计算负担上的差异;从而为这一类模糊预测控制的实际应用提供了选择的依据,也为进一步的性能分析奠定了基础。

3、根据锅炉系统复杂、干扰频繁、全局模型建立困难的实际情况,通过对其水位特性的分析,提出一种基于 T-S 模型的多模结构的模糊预测控制算法,并在 DCS 系统中开发了实时控制的软件。实际应用表明本算法能够很好地通过在线辨识 T-S 模型从而实现对具有非线性特性的水位对象的预测控制及获得良好的控制精度。

关键词: 模糊辨识; 非线性系统; 预测控制

Abstract

With the development of technology and productivity, the systems of the industrial process control become more complex due to the lack of precise, formal knowledge about system, strongly nonlinear behavior, the high degree of uncertainty, time varying characteristics, close coupled and high dimensional system, etc. Owing to the lack of precise mathematical model, it is difficult, even impossible, to control such complex systems. From the point view of modeling and control, we discuss the application of Fuzzy Predictive control based on T-S model in Sugar Boiler System in this paper. The main contents are concluded as followings:

1. In view of modeling problems of nonlinear and dynamic system, self-organizing fuzzy identification algorithm (SOFIA) is presented based on T-S model in this paper. The procedure for finding the optimal identification is simplified, and both the premise and consequent parameters are identified simultaneously by using the SOFIA. Because of reduction of computational requirement for identifying a Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model by efficient parameter and structure identification, this algorithm can be used in on-line modeling. A lot of simulation results show that the SOFIA has the high convergence rate, accuracy and good stability. It can be conveniently applied to engineering practice.

2. Based on the introduction of the principles of Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model and generalized predictive control (GPC) algorithm, the fuzzy predictive control method combining GPC and T-S model is classified as three kinds of algorithms. The design method of these algorithms is presented in detail. A comparison of these FGPC strategies in control performance and complexity of computation is livening by simulation.

3. In this paper, Takagi-Sugeno fuzzy models are chosen as the model structure. With these algorithms above, a simulation test has been taken to the water height control of boiler by means of Generalized Predictive Control using Takagi-Sugeno fuzzy models. The test shows that T-S model of the nonlinear system can be successfully identified on line and can be controlled successfully using predictive algorithm.

Key words: Fuzzy Identification;Nonlinear System;Predictive Control

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 预测控制	2
1.2.1 预测控制的基本原理	2
1.2.2 预测控制的研究概况	4
1.2.3 预测控制的工业应用	6
1.3 模糊控制的概念及其特点	6
1.4 智能预测控制(IMPC)	8
1.4.1 模糊预测控制(FMPC)	8
1.4.2 基于神经网络和遗传算法的预测控制	11
1.5 本文的研究内容和主要的创新点	11
第二章 T-S 模糊模型及模糊辨识方法	13
2.1 引言	13
2.2 T-S 模糊模型	14
2.2.1 T-S 模糊系统的一般定义	14
2.2.2 典型 T-S 模糊系统具有通用逼近性	15
2.3 模糊辨识方法	18
2.3.1 基于模糊关系方程的辨识方法	19
2.3.2 基于模糊神经网络模型的辨识方法	20
2.3.3 基于 T-S 模糊模型的辨识方法	22
2.3.4 模糊辨识领域需要解决的实际问题	25
2.4 仿真示例	25
第三章 基于模糊聚类的模糊辨识算法研究	28
3.1 引言	28
3.2 基于随机采样模糊聚类的模糊辨识方法	29
3.3 模糊 C-划分方法	30
3.3.1 第一类结构	30
3.3.2 第二类结构	40
第四章 基于 T-S 模型的模糊广义预测控制	36
4.1 引言	36
4.2 基于 T-S 模糊模型的模糊广义预测控制	36
4.2.1 广义预测控制基本方法	36
4.2.2 T-S 模糊预测模型	38
4.3 模糊 GPC 的三种结构	39
4.3.1 第一类结构	39
4.3.2 第二类结构	40

5.4.1 系统结构和功能.....	61
5.4.2 系统的硬件组成.....	63
5.4.3 系统的软件组成.....	64
5.5 结束语	65
第六章 总 结	67
6.1 本文研究内容小结	67
6.2 模糊预测领域的研究方向	67
附录程序代码（MATLAB 编程）	69
1. 增广最小二乘法	69
2. 广义预测控制（GPC）仿真.....	69
3. 模糊自组织聚类	71
4. FCM 辨识	72
5. T-S 模型辨识.....	73
6. 模糊 GPC 与 PID 控制对比研究	74
参考文献.....	78
攻读学位期间公开发表的论文	83
致 谢.....	84

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Brief introduction.....	1
1.2	Predictive Control	2
1.2.1	General Principles of Predictive Control	2
1.2.2	Research Overview of Predictive Control	4
1.2.3	Apply Scope of Predictive Control	6
1.3	Fuzzy Control	6
1.4	Intelligent Predictive Control.....	8
1.4.1	Fuzzy Predictive Control(FPC).....	8
1.4.2	Predictive Control of Nerve-network & Genetic Algorithm.....	11
1.5	Framework	11
Chapter 2	T-S Model & Fuzzy Identification	13
2.1	Introduction	13
2.2	T-S Model	14
2.2.1	General Definition of T-S Model	14
2.2.2	Special Terms Of T-S Model.....	15
2.3	Fuzzy Identification	18
2.3.1	Fuzzy Identification based on Fuzzy Relation Equation	19
2.3.2	Fuzzy Identification based on Nerve-network Model	20
2.3.3	Fuzzy Identification based on T-S Model	22
2.3.4	Prospect.....	25
3.8	Brief Summary	34
Chapter 4	FGPC based on T-S Model	36
4.1	Introduction.....	36
4.2	Simulations.....	39
4.2.1	WRLSA Simulation	39
4.2.2	T-S Model	38
Chapter 3	Self-Organized Fuzzy Identification	28
4.3	Three Structures of FGPC.....	39
3.1	Introduction	28
4.3.1	The First Structure	39
3.2	Fuzzy Clustering.....	29
4.3.2	The Second Structure	40
3.3	Fuzzy-C Algorithm.....	30
4.3.3	The Third Structure	40
3.4	FCM Algorithm	30
4.4	Simulations.....	41
3.5	Choose Of Data Set	30
4.4.1	Fuzzy Identification based on T-S Model	41
3.6	Fuzzy Identification based on WRLSA Method.....	31
4.4.2	Results Comparision	44
3.7	Simulations.....	33
4.5	Brief Summary	47
Chapter 5	Application on Water System by using FGPC	49

References.....	78
Appendix	83
Acknowledgement.....	84

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

1.1 引言

预测控制，也称模型预测控制 (Model Predictive Control, 简称MPC)，是上世纪70年代后期直接从工业过程控制中发展起来的一类新型计算机控制算法，产生于来自复杂工业生产向高层优化控制提出的挑战。众所周知，控制理论与控制实践之间长期存在着一条鸿沟，主要表现在：实际工业过程的高维复杂性，使建立精确的数学模型相当困难；工业对象的结构、参数、环境的不确定性，使建立在所谓精确模型基础上的先进控制策略难于实现有效控制；现代控制理论提供的复杂算法难以满足工业过程控制的实时性、经济性的要求。为克服理论在实践应用中的不足，人们试图寻找一种对模型精度要求低且易于获取、综合控制质量好、在线计算方便的新型优化控制方法。预测控制就是在这种背景下发展起来的一种新型的计算机控制方法。

预测控制的主要思想方法是由Richalet.J等人在1978年提出的^[1]，其核心思想为滚动优化。由于采用多步预测、滚动优化和反馈校正等控制策略，因而预测控制效果好、鲁棒性强，适用于建模困难的复杂工业生产过程，受到国内外控制界的高度重视，并在石油、化工、电力、冶金、机械等工业部门的控制系统中得到了成功的应用^[4,5,6]。是一类很有发展前途的先进控制技术，所以对这类控制算法的研究无论是在理论上还是实际的应用中都具有很大的价值。实践中，许多大规模的复杂系统很难用精确的数学表达式来表示其模型，于是智能控制的出现，可以有效地将熟练操作工、技术人员或专家的经验知识与控制理论结合起来去解决复杂系统的控制问题。

自从1965年美国加州大学的Zadeh教授创建模糊集合理论^[7]和1974年英国的Mamdani教授成功地将模糊控制应用到蒸汽机控制以来，模糊控制得到广泛地发展并在现实中得以成功的应用^[9,10]。近年来，模糊控制作为一种新颖的智能控制方式越来越受到人们的重视。如果说，传统的控制是从被控对象的数学结构上去考虑进行控制的，那么，模糊控制则是从人类智能活动的角度和基础上去考虑实施控制的。由于模糊控制不需要精确的数学模型，因此它是解决不确定性系统控制的一种有效的智能控制方式。

随着智能控制技术的进展，预测控制将已取得的成果与模糊控制、神经网络以及

遗传算法、专家控制系统等智能控制策略相结合，正朝着智能预测控制的方向发展，从而进一步增强了预测控制面对复杂环境、复杂对象和复杂任务的处理能力，拓展了预测控制的理论研究和应用领域，也充分显示出智能预测控制的重大实用价值^[11,12,13]。综上所述，模糊预测控制技术也必定具有重要的研究价值。

1.2 预测控制

1.2.1 预测控制的基本原理

一般而言，MPC是用来在线解决一个有限时域内的开环优化控制问题并使之服从含有状态与控制的动态和约束^[14]。图1-1显示了预测控制的基本原理：基于 t 时刻获得的测量值，根据受控系统的预测模型，控制器预测未来 T_p 时刻系统的动态行为，并计算未来 T_c 时刻的开环控制量 u ($T_c < T_p$)，使系统预测输出达到给定值，从而使系统的开环性能指标达到最优。如果被控对象稳定、没有干扰和模型失配，则在有限预测时域和控制时域内优化达到最优时，我们就可以将此开环控制量 u 用于系统从 $t=0$ 时刻直至 $t>0$ 的所有时刻。然而，实际上这种情况是不可能的，因为干扰和模型失配问题的存在，实际系统不同于预测行为，为此将一些反馈机制用到此方法中，开环控制量 u 将只能在下一个测量到来前有效。我们假设每一采样时刻 S ，更新测量，在 $t+5$ 时刻，整个过程包括预测和优化，被重复并得到一个新的控制量，预测和控制时域向前移动（因为这个原因，MPC也称为滚动时域控制）。

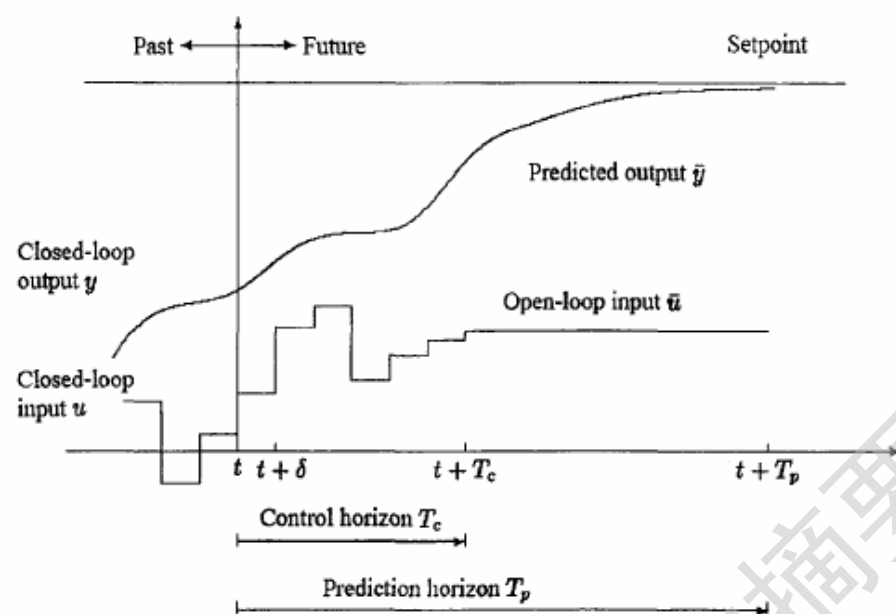


图1-1 预测控制原理图

得到比常规控制更好的控制效果。

二、滚动式的优化

预测控制是一种优化控制算法，它是通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用的。这一性能指标涉及到系统未来的行为，例如，通常可取对象输出在未来的采样点上跟踪某一期望轨迹的方差最小。然而需要强调的是，预测控制中的优化与传统意义下的离散最优控制有很大的区别。这主要表现在预测控制的优化是一种有限时段的滚动优化。在每一采样时刻，优化性能指标只涉及到从该时刻起未来有限的时间，而到下一采样时刻，这一优化时段向前推移。因此，在预测控制中，优化不是一次离线进行，而是反复在线进行的，这就是滚动优化的含义，也是预测控制区别于传统最优控制的根本点。

三、反馈校正

预测控制是一种闭环算法。在通过优化确定了一系列未来的控制作用后，为了防止模型失配或环境干扰引起控制对理想状态的偏移，预测控制通常不是把这些控制作用逐一实施，而只是实现本时刻的控制作用。到下一采样时刻，则首先检测对象的实际输出，并利用这一实时信息对基于模型的预测进行修正，然后再进行新的优化。

1.2.2 预测控制的研究概况

一般地可将现有的各种预测控制分为基于非参数的模型预测控制和基于参数的模型预测控制两大类：

第一类为基于非参数化模型的模型预测控制，主要代表是Richalet(1978)、Mehra(1982)^[12]等提出的建立在脉冲响应模型基础上的模型预测启发控制(MPHC)或模型算法控制(MAC)、Cutler(1980)^[17]等提出的建立在阶跃响应基础上的动态矩阵控制(DMC)。这类预测控制算法的特点是：脉冲响应和阶跃响应在工业现场易于获得，不再需要复杂的系统辨识建模；采用反馈校正基础上的在线滚动优化取代传统最优控制；可以克服各种不确定的影响，增强控制的鲁棒性，而且在线计算简单。因而这类算法很适合于实际工业过程的控制需要，很快引起了广泛兴趣并得到大量成功的应用。

第二类是基于参数化模型的预测控制，主要有Clarke(1987)^[13]提出的广义预测控制(GPC)和Lelic(1987)^[18]提出的广义预测极点配置控制(GPP)。这类算法保持了MPC算法的基本特征，但采用的是受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA)或受控自回归滑动

从1978年Richalet等人提出模型预测启发式控制算法(MPHC)以来，预测控制得到了蓬勃的发展和不断的完善。主要算法有：模型算法控制(MAC)；动态矩阵控制(DMC)；广义预测控制(GPC)；广义预测极点(GPP)控制；内模控制(IMC)和现在比较流行的智能预测控制(IMPC)等等。预测控制遵循一种方法学，无论其算法形式如何，都是建立在公认的预测控制的三大方法机理上，即基于模型的预测、滚动式的优化和反馈校正^[11,15,16]。

一、基于模型的预测

模型预测控制是一种基于描述系统动态特性模型的控制算法，这一模型就称为预测模型。它的功能是根据被控对象的历史信息和未来的输入预测系统的未来输出。预测模型只强调模型的功能而并不强调其结构形式。因此，它可以是被控过程的脉冲响应、阶跃响应等非参数模型，也可以是微分方程、差分方程等参数模型。此外，非线性系统、分布参数系统的模型，只要具备上述功能，也可在对这类系统进行预测控制时作为预测模型使用。因此，预测控制打破了传统控制中对模型结构的严格要求，更着眼于在信息的基础上根据功能要求按最方便的途径建立模型。预测模型具有展示系统未来动态行为的功能。这样，就可以利用预测模型为预测控制进行优化提供先验知识，从而决定采用何种控制输入，使未来时刻被控对象的输出变化符合预期的目标，

平均模型(CARMA)。在80年代初期,人们在自适应控制理论研究的过程中,为了增强自适应控制系统的鲁棒性,在广义最小方差基础上,汲取预测控制中的多步预测优化策略,而出现了基于辨识受控参数模型且带有自适应控制或为增加系统稳定性而配置极点的预测控制算法。由于将自适应机制与预测控制相结合,因而可及时修正参数变化产生的预测模型的预测误差,从而改善系统的动态性能,同MAC和DMC一样,GPC在工业工程控制中也获得了大量成功应用。

此外,预测控制还有一些独特的分支如:内模控制(IMC)^[19]、预测函数控制(PFC)^[37]、简化模型预报控制(SMPC)^[20]。Garcia和Morari已证明,MAC和DMC都是IMC的特例,IMC有很好的性质,综合了各种无约束预测算法的长处,能通过有物理意义参数的调整实现在线校正,保证了闭环稳定性。Soeterboek提出的统一预测控制(Unified Predictive Control)^[21]则把预测控制统一到同一数学描述。

各类模型预测控制算法虽然在模型、控制和性能上存在许多差异,但其核心都是基于时域后退原理,即在每一采样时刻,优化总是以该时刻起未来一段时域的性能为指标,同时以该时刻起的若干控制增量为优化变量,但实施时只取当前时刻的控制作用。

预测控制不仅仅是一种先进的控制策略,而且是普遍地存在于人们行为活动过程中的方法学,我们应该站在这个高度上来研究和发展席裕庚教授在文献[22]中应用大系统理论的分层递阶理论,分析了预测控制与智能控制结合的可能性和必要性。指出工业界已提出要进一步解决不确定性描述、不确定性环境下多目标优化决策、实时控制、快速计算等问题。预测控制正面临着这一新的挑战,需要从信息论、人工智能、控制理论等多方面吸取有价值的思想,向智能化方向发展。预测控制向智能化的发展将形成多层智能控制。在这种模式中,控制目标是不同层次的,每一层次都有相应的预测模型、优化和校正方式,预测控制为智能控制的发展提供了方法学。

预测控制向智能化方向的发展,不仅是工业优化控制的必然结果,也是当前预测控制发展不足的必然结果。其一,当前预测模型仍采用较单纯性模型,没有更充分地利用预测模型以功能取代结构的建模思想,应着重建立高质量信息集合的预测模型;其二,预测控制的优化计算中虽然采用各种简化措施来减轻计算量,但对于特殊应用场合及自适应情况下的优化计算,仍然负担较重;其三,预测控制采用了较大的采样周期,抗干扰能力仍不够理想;其四,由于预测误差要靠反馈来校正,目前的校正方

法有限。

综上所述,预测控制向智能化方向发展已经成为一个必然的趋势。

1.2.3 预测控制的工业应用

预测控制从工业实践中产生以来,随着其理论研究的不断深入,它在工业过程中的应用也越来越广泛,应用范围遍及石油、化工、炼油、冶金、造纸、航空、机械制造、食品加工、窑炉、液压传动、航海、军事等几乎所有行业,而近几年更是有不断增长的趋势。预测控制已经成为工业领域中应用最多的一种先进控制策略,其使用带来了巨大的经济效益。

在另一方面,预测控制的工程软件的产品化也随着技术的发展而不断更新,目前许多控制工程公司均开发出商品化的预测控制软件包^[23],较著名的有:美国DMC公司的DMC,shell石油公司的QDMC,法国ADSERA公司的HIECON和PFC,美国Setpoint公司的QDMC以及Honeywell公司的HPC等。国内的以上海交通大学过程控制研究所为主的研究机构在国家“九·五”攻关项目中自主开发的预测控制软件包,目前已经在石油化工领域获得成功的应用。目前MPC软件包已经比较成熟,相比较来说NMPC由于理论发展还不很成熟,商品化控制软件包技术也相对滞后,还需要进行不断的开发和完善。工程实践和理论研究两方面的相互促进,通过在模型识别、优化算法、控制结构分析、参数整定和有关稳定性和鲁棒性研究等方面的一系列工作,终于使预测控制成为一种比较成熟的控制思想,并成为目前过程控制领域应用最成功、也最有前途的先进控制策略。

1.3 模糊控制的概念及其特点

在工业过程控制实践中,有许多难以对付的控制问题,如锅炉、水泥窑及生化反应等过程,因非线性、时滞、机理复杂等因素而难以建模,用常规控制方法难以有效控制。然而,富有经验的操作者却能运用人所特有的观察、推理和学习能力,通过直觉安全而有效地对这一类过程进行控制。由于模糊控制通常是对这种人类解决方案的最好近似,因此它也可以有效地处理这些控制问题。

1965年,美国控制专家Zadeh L.A首次提出了一种完全不同于传统数学与控制理论

的模糊集合理论，其核心是对复杂的系统或过程建立一种语言分析的数学模式，使人类日常生活中的自然语言能直接转化为计算机所能接受的算法语言，为描述、研究和处理模糊性现象提供了新的数学工具。从广义上讲，模糊控制就是以模糊集合理论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理为基础的一种计算机控制方法；利用操作人员的实践经验和直观感觉或一些不精确的控制规则所产生的控制策略，将状态条件和控制作用表示为一组被量化的模糊语言值，然后利用模糊数学的方法，并借助计算机等手段而完成的过程控制。模糊控制虽然是建立在模糊集合论的基础之上，但它的控制输出仍为精确量。模糊控制理论成功地在准确和简明之间取得平衡，不仅对复杂的控制对象有了实际的描述，而且能够高效率地对复杂事物做出正确的判断和处理，从而满足控制性能的要求。

与传统的控制技术相比较，模糊控制具有如下的特点：

(1)在设计系统时不需要建立被控对象的数学模型。模糊控制器的基本出发点便是对现场操作人员或者有关专家的经验、知识以及操作数据加以总结和归纳，形成一定的规则参与控制过程。

(2)适应性强。经研究结果表明，对于确定的过程对象，用模糊控制与用PID控制的效果相当；但是对于非线性和时变等一类不确定系统，模糊控制却有较好的控制作用，同时对于非线性、噪声和纯滞后有较强的抑制能力。

(3)系统的鲁棒性较强，对参数变化不灵敏。由于模糊控制采用的不是二值逻辑，而是一种连续多值逻辑，所以当系统参数变化时，能比较容易实现稳定的控制，尤其是适合于非线性、时变、滞后系统的控制。

(4)系统的规则和参数整定方便。只要通过对现场工业过程进行定性的分析，就能比较好的建立语言变量的控制规则，确定系统的控制参数，而且参数的适用范围较广。

(5)结构简单，系统的软硬件实现都比较方便。对于基本的模糊控制器，在实际运行时只需进行简单的查表运算，而其它的过程可以离线进行。因此这种控制方法很容易被现场工程技术人员和操作者所掌握。

另外，一些学者从数学的角度证明了各类Mamdani和T-S模糊系统是万能逼近器^[24,25,26]，即它们能够以任意精度一致逼近定义在闭定义域 D 上的任意连续函数。从控制和建模的角度来看，即是模糊系统能够对任意非线性系统实现连续控制规律和建立非线性控制模型。这是模糊逻辑系统能够用来辨识复杂工业过程、实际测得的对象输出

修正或补偿预测模型。此外，由于它还采用多步预测的方式，扩大了反映过程未来变化趋势的信息量，因此能克服各种不确定性和复杂变化的影响，使得这种控制策略更加适用于复杂的控制系统，并在复杂的工业过程中获得了广泛的应用。

模糊控制技术具有上述的特点，因而越来越吸引广大研究者的注意，同时模糊控制在实际的工业以及其它领域的控制过程中，也发挥着越来越重要的作用。但需要指出的是，传统的模糊控制同PID算法一样，均为“事后调节”，因而对迟延对象的控制效果不很理想。解决办法之一就是与预测控制原理结合起来。因而，模糊控制与其他先进控制的融合技术已经成为目前研究的热点和前沿方向。本文后面将主要讨论模糊控制与预测控制结合而形成的模糊预测控制算法。

1.4 智能预测控制(IMPC)

前面1.2节已经指出预测控制智能化是一个必然的发展趋势，智能预测控制的发展进一步增强了预测控制面对复杂环境、复杂对象和复杂任务的处理能力，拓展了预测控制的理论研究和应用领域。近年来，智能预测控制方法的内容非常丰富，具体算法层出不穷。根据预测控制和智能控制的融合点，可划分为以下几类：

1.4.1 模糊预测控制(FMPC)

一、 模糊预测控制的基本原理

模糊控制是智能控制中较早、也是研究较为广泛的一种形式。模糊控制和预测控制是各自独立发展起来的两种控制理论范畴，在两者充分发展的基础上，将模糊的思想和预测的思想结合形成的模糊预测控制具有内在的合理性：预测控制和模糊控制都是针对不确定系统的有效控制方法，二者相结合会进一步提高控制效果；模糊控制发展的趋势是由规则向模型转变，而预测控制中的预测模型可以作为两者沟通的桥梁；预测控制是一类基于模型的精确控制方法，而系统的复杂性与分析系统所能达到的精度是互相制约的，因此，研究模糊环境下的预测控制对于拓展预测控制的应用范围具有重要意义。

分析现有的模糊预测控制算法不难发现，目前的模糊预测控制算法基本上都是围绕以下两种思路展开：

(1)以过程预测信息为核心的模糊预测控制

这类算法特点在于：在传统的预测控制结构基础上，在预测模型的信息处理环节中引入模糊技术，从而构成模糊预测控制算法。根据信息处理方式的不同，又可分为如下两种方法：

1.1利用模糊建模方法建立对象预测模型的模糊预测控制

这一类算法通过模糊推理建立系统的模型，并根据这一模型对系统的输出进行预测，然后利用已有的预测控制算法得到控制律。因此与传统的预测控制相比，其核心问题是模糊建模。目前常用的建模方法有：(1)建立对象的模糊预测关系模型，这等价于模糊关系矩阵R的辨识问题^[27,28]。(2)建立对象的T-S模糊模型^[29,30]。

1.2利用模糊技术对预测误差、控制律等进行补偿的模糊预测控制

利用模糊推理补偿技术的模糊预测控制算法是建立在信息分层处理技术基础之上的。席裕庚教授曾提出的着眼于信息处理的多重预测方法一就是将模型预测和误差预测结合起来。这种信息的分层处理技术不但可以适应对象、环境的变化，而且淡化了对基础模型的要求^[31]。

(2)以模糊决策优化为核心的模糊预测控制

预测控制的核心在于滚动优化，因此整个算法最终可以归结为一个性能优化问题。传统的预测控制仍然采用基于线性二次型目标函数的优化方法，即在控制时域内最小化目标函数以求出最优控制律。但是对于复杂系统，这种方法所要耗费的代价是非常大的，有时甚至是不可能的。由于模糊控制从某种程度来讲，就是选择一组控制器参数使控制器输出接近最优控制律，因此众多学者将模糊决策引入预测控制算法，从而得到各种基于模糊决策优化的模糊预测控制算法，主要有两类：根据预测输出通过模糊决策对控制量进行调整的直接型控制算法^[32,33]，根据预测输出通过模糊决策对控制器内部参数进行优化，间接地得到次最优控制量的间接型控制算法^[34,35]。

目前的模糊预测控制算法的出发点主要是：利用模糊推理对不确定性过程信息的良好处理和决策能力来改善预测控制性能；或者是将预测控制思想引入到模糊控制之中，对传统模糊控制算法进行修正，使之适应那些具有大滞后特性的不确定对象的控制。但是大多数现有的算法只是模糊控制和预测控制的方法、概念表层的简单结合。它们虽然可以克服原有算法的某些不足，但不能从根本上解决这些问题。例如：大多数算法仍然沿用传统的模糊控制器设计方法，由于模糊控制器源于启发式直觉推理，

其本身的推理方式难于保证控制效果的最优。因此在解决模糊控制器的优化设计尤其是在线优化问题时，引入预测控制中的反馈校正和滚动优化机制不失为一种值得研究的方法。此外，在模糊预测控制中考虑多目标、多约束等实际控制问题也是今后有待解决的问题之一。

二、 模糊预测控制的研究概况

1983 年，日本的安信诚二等人最早提出模糊预测控制，并成功应用于地铁列车的控制上^[36]。1991 年，Cucal 等人设计了一种模糊专家预测控制器^[37]，利用预测模型的超前预测误差来调整控制器规则。1992 年，李静如等人提出一种新的模糊预测控制算法^[38]，它将预测控制与模糊控制相结合，应用于一类复杂的工艺过程的终点控制，以预测模型对控制效果进行预报，并根据目标偏差和操作者的经验，应用模糊决策方法在线修正控制策略。1993 年，张化光等提出了一种基于辨识模型的多变量预测控制方法^[39]，它由模糊辨识和广义预测控制器两部分组成，采用线性系统理论来设计广义预测控制器，简化了设计，提高了跟踪速度，增强了抗干扰能力。1997 年，李少远提出一种基于模糊推理的广义预测的组合控制^[40]，通过对输出误差及偏差变化率的测量，根据模糊推理对偏差进行校正。模糊控制和预测控制分别利用对象的定性和定量的信息，分别设计，互不干扰。这种组合式模糊预测控制，对模型失配有较好的鲁棒性，而且使预测时域和控制时域等参数的选取变得容易。徐立鸿(1997)针对模型失配，提出一种鲁棒性较强的加权组合预测控制^[41]，控制器输出分为预测控制量和模糊控制量，二者的加权因子是对象类型和建模误差的函数。2000 年，乔俊飞等人针对具有不确定性的冷轧过程控制，提出一种基于模糊预测的无辨识自适应控制方法^[42]，通过检测过程的实际输出和期望输出，利用模糊预测控制校正无辨识自适应律。近年来，模糊预测控制有了很大的发展^[36-43]，其中基于 T-S 模糊模型的预测控制对于非线性、时变的复杂被控过程的控制效果明显，因而在模糊预测控制中被广泛运用^[44-48]。

1.4.2 基于神经网络和遗传算法的预测控制

神经网络理论由于其在求解非线性系统方面的巨大优势，很快被应用于预测控制中，并形成许多不同的算法。神经网络预测控制是利用作为非线性对象辨识模型的神经网络产生预测信号，然后采用优化技术求出控制量，从而实现对非线性系统的预测控制^[49]。控制中用的较多的是反向传播(BP)网络和径向基函数(RBF)网络，二者均有

很强的生物背景和逼近任意非线性函数的能力^[50,51]。前者的输出与网络的连接相之间呈非线性关系，这使得其学习算法必须采用非线性优化方法，因而不可避免地要存在局部极小点的问题。对于RBF网络，虽然具有唯一最佳逼近点的优点，其网络的连接权与输出呈线性关系的特点使得它采用可保证全局收敛的线性优化算法，但其中心点的选择不易。从神经网络模型方面看，存在着对不同的非线性对象，神经网络模型的选取及其结构的确定等问题；而从非线性辨识方面看，则存在充分激励、过参数辨识、带噪声系统的辨识、辨识算法的快速性和收敛性等问题。对这两方面问题，需要将现有的非线性理论和优化方法应用于其中并加以发展。另外，由于被控对象和神经网络本身都是非线性的，故神经网络的建模算法、控制系统的收敛性和稳定性等问题，解决起来有很大的难度。

尽管遗传算法被公认为是一种鲁棒性较强，能处理大规模复杂问题的寻优算法，但由于计算负担大，长期以来在控制中只被用于离线优化控制器参数。随着计算机计算速度的不断提高和遗传算法本身的不断改进，近年来开始将其引入到非线性预测控制的在线优化中^[52,53]。

目前，预测控制的研究方向还对这些方面产生了极大的兴趣：将早期的预测控制研究成果与近几年发展起来的各种先进控制相结合的先进预测控制、多种新型的预测控制理论与应用如自适应预测控制、预测函数控制、鲁棒预测控制等，并已经取得了不少有意义的研究成果^[54,55,56]。

1.5 本文的研究内容和主要的创新点

(1)回顾了预测控制、模糊控制的基本原理和主要特点；分析了预测控制和智能控制结合的可能性和必然性；归纳总结了预测控制的研究现状。

(2)分析了T-S模糊模型及系统辨识方法；并结合分析提出了一种基于模糊聚类的模糊辨识算法，给出了仿真实例，显示了模糊辨识法和T-S模型的优越性。

(3)分析了三种基于T-S模糊模型和广义预测控制结合的模糊预测控制方法，并针对非线性控制对象进行仿真，结果表明T-S模型具有很好的跟踪特性；针对三种模糊广义预测控制算法进行仿真、分析和比较，为实际中设计模糊预测控制方法提供了依据。

(4)针对广西雷平糖厂锅炉水位系统的特性，提出了基于T-S模型的多模型加权控制

算法，并进行了仿真研究及硬件设计。仿真结果证明了其良好的控制特性。

第二章 T-S 模糊模型及模糊辨识方法

2.1 引言

自1965年Zadeh提出模糊集合理论以来，对复杂非线性系统的模糊辨识和模糊控制受到人们很大的重视，并被广泛地应用到工业生产中^[57,58]。一个完善的数学模型对于最优控制器的设计和稳定性分析都是非常重要和必要的。如何根据系统输入输出数据和对被控对象的定性分析得到其数学模型，即是建模问题；如何得到数学模型的各个参数，即为模型辨识问题。总的来说，系统建模和辨识无论在理论上还是实际应用中，都远未达到完善的程度，还有大量的工作需要去做。模糊模型是一种本质非线性模型，易于表达非线性系统的动态特性，而且从理论上已经证明了模糊系统是一种万能逼近器，可以按任意精度逼近任意非线性系统，因此模糊模型的建模和辨识被认为是解决非线性问题的一种可行方法。目前，人们研究最广泛的模糊模型主要有三种：(1)Pedrycz于1984年提出的模糊关系模型^[59]。这类模型可以看作是从输入空间到输出空间的一个模糊映射，但在建模过程中系统的许多重要的动态信息被忽略了，因此很难得到控制性能良好的控制器。(2)模糊动态模型^[60]。这类模型的模糊规则是以状态方程的形式表出，其动态系统的复杂性和辨识参数的困难性使得控制器的设计比较困难。(3)Takagi和Sugeno于1985年提出的T-S模糊模型^[61]。其主要思想是把输入空间分成若干个模糊子空间，在每个子空间里建立关于输入输出的简单的线性关系模型。模糊规则前件用来表示模糊子空间，后件表示在这个模糊子空间里输入输出之间的线性关系。T-S模型本质上是一种非线性模型，它易于表达复杂系统的动态特性。其结论部分采用线性方程式描述，因而便于采用传统的控制策略设计相关的控制器及对控制系统进行分析。T-S模型是现在应用最为广泛的一种模糊模型，本文中将进行详细介绍。模糊辨识是系统辨识在基于特定模糊模型上的辨识方法，由于在辨识的过程中既可以利用定量的信息，又可以利用定性的信息，其辨识结果是可得到被控对象的定性定量相结合的模型，因而深受广大学者的青睐^[62,63]学者证明了模糊系统可以在任意精度上逼近一个连续实函数^[64,65,66]的理论依据。模糊控制理论在复杂系统中的应用，尤其是在系统存在定性的、不精确甚至不完整信息情况下的应用，推动了模糊辨识研究的进一步深入。其中典型的模糊辨识方法主要有：基于模糊关系方程的辨识方法；基于模糊神经网络的辨识方

法；基于T-S模糊模型的辨识方法。本文采用的是T-S模糊模型，下面将对T-S模糊模型和模糊辨识方法进行详细介绍，并对T-S模型的通用逼近性加以证明。

2.2 T-S 模糊模型

一个典型的T-S模糊系统，即是采用输入变量的线性函数作为规则后件的多输入单输出(MISO)T-S模糊系统。现有的绝大多数文献中研究的T-S模糊系统均属于此类。下面就介绍一下T-S模糊模型的定义，并证明典型的T-S模糊系统能以任意精度逼近紧致集上的任意连续实函数。

2.2.1 T-S 模糊系统的一般定义

Takagi和Sugeno于1985年提出了著名的T-S模糊模型。T-S模型是基于输入模糊化分的思想，可以看作是分段线性化的扩展，能描述一类非常广泛的静态或动态非线性系统，非常适于基于模型的控制系统及其稳定性分析。一个典型的MISO动态系统由n条模糊规则组成的集合来表示，这种模糊模型的形式为：

$$\begin{aligned} R^i: & \text{ if } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, x_m \text{ is } A_m^i, \\ & \text{ then } y^i = p_0^i + p_1^i x_1 + p_2^i x_2 + \dots + p_m^i x_m, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中， R^i 表示第*i*条模糊规则， A_j^i 是一个模糊子集，其隶属函数中的参数为前提参数； x_j 是第*j*个输入变量；*m*是输入变量的数目； y^i 是第*i*条模糊规则的输出； p_j^i 是第*i*个模糊规则结论中的第*j*个参数； $i=1, 2, 3, \dots, n$ ； $j=1, 2, \dots, m$ 。可见，T-S模型在前提中使用并列条件，而在结论中选用线性函数。

(1)模糊规则的形式

假定模糊蕴涵 *R* 的形式为：

$$R: \text{ if } f(x_1 = A_1, \dots, x_k = A_k), \text{ then } y = g(x_1, \dots, x_k) \quad (2-2)$$

式中，*y*是结论（即推断结论值）， x_1, \dots, x_k 是前提变量， A_1, \dots, A_k 是具有线性隶属函数的模糊集，用来描述可用作推理的模糊子空间，*f*是前提中连接命题的逻辑函数，*g*是当 x_1, \dots, x_k 满足前提时蕴涵*y*的函数。

(2)推理算法

如果蕴涵 R^i , $i=1, 2, \dots, n$ 有以上形式, 当给定 $x_1 = x_1^0, \dots, x_k = x_k^0$, y 的值可由以下步骤推出:

(2.1) 对每一个蕴涵 R^i , y_i 在结构中由函数 g 计算可得

$$y^i = g^i(x_1^0, \Lambda, x_k^0) = p_0^i + p_1^i x_1^0 + \Lambda + p_k^i x_k^0 \quad (2-3)$$

(2.2) 命题 $y=y^i$ 的真值由方程

$$\begin{aligned} |y = y^i| &= |(x_1^0 \text{ is } A_1^i, \Lambda, x_k^0 \text{ is } A_k^i) \wedge R^i| \\ &= (A_1^i(x_1^0) \wedge \Lambda \wedge A_k^i(x_k^0)) \wedge |R^i| \end{aligned} \quad (2-4)$$

计算而得到, 其中 $|*|$ 表示命题 $*$ 的真值, \wedge 为取小运算, 且 $(x^0 \text{ is } A) = A(x^0)$, 即 x^0 的隶属函数的等级。

为计算简单, 设定

$$|R^i| = 1$$

于是该结论的真值可由

$$|y = y^i| = A_1^i(x_1^0) \wedge \Lambda \wedge A_k^i(x_k^0) \quad (2-5)$$

得到。

(2.3) 最终的输出 y 从 n 个规则由所有 y^i 加权平均数得到 (其权重为 $|y=y^i|$)。

$$y = \frac{\sum |y = y^i| \times y^i}{\sum |y = y^i|} \quad (2-6)$$

T-S模型的最主要的特征就是: 以线性函数表示每一个模糊蕴涵的局部特性, 总的模糊系统输出是由这些线性函数的模糊“融合”得到, 但是T-S模型本质上是非线性的, 是一种动态系统的典型的模糊模型。T-S模型能以任意精度逼近非线性动态系统, 下面将对这种通用逼近性进行证明。

2.2.2 典型 T-S 模糊系统具有通用逼近性

下面将证明典型T-S模糊系统具有通用逼近性^[67,68,69]。

模糊系统的通用逼近性是要回答这样的问题: 模糊系统是否能够以任意精度逼近紧致集上的任意连续实函数? 对这一问题的回答无论在理论上还是应用上都有极为重要的意义。这是因为从数学上看, 模糊系统实现的是从输入论域到输出论域的函数映射。当模糊系统用作系统辨识时, 通用逼近性决定了它是否能够逼近任意连续的非线性动态模型; 当模糊系统用作控制时, 通用逼近性决定了它对任意非线性动态对象是

否能够逼近任意连续的非线性控制曲线, 以实现所要求的闭环系统动态品质。可以说, 模糊系统所有的理论研究和实际应用都是建立在模糊系统通用逼近性的基础之上的。常用的模糊系统可以分为两大类: Mamdani模糊系统和T-S模糊系统。这两类模糊系统的主要区别在于它们的规则后件。Mamdani模糊系统采用模糊集作为规则后件, 而T-S模糊系统采用输入变量的线性或非线性函数作为规则后件。对模糊系统通用逼近性的研究已经取得了很大的进展^[65-71], 大多数成果研究的都是Mamdani模糊系统^[65-68]文献研究了T-S模糊系统^[69,70]在用线性解模糊代替常用的重心法解模糊的件下得到了两输入一输出T-S模糊系统是通用逼近器的结论。这些成果均是在对T-S模型进行某种简化和限制条件下得到的。

这里的证明采用2.2.1节中介绍的典型T-S模糊系统, 其中没有对典型T-S模糊系统进行任何简化, 即它可以有任意个输入变量、每个输入变量可以有任意个数和任意形状隶属函数的模糊子集、采用普遍使用的重心法解模糊。在每个输入变量的模糊子集满足一致性、隶属函数连续且分段可微的条件下, 我们将分两步证明典型T-S模糊系统是通用逼近器: 首先证明典型T-S模糊系统能够一致逼近任意多元多项式函数, 然后再利用Weierstrass逼近定理证明典型T-S模糊系统能够以任意精度一致逼近紧致集上的任意连续实函数。

(1) 数学准备

针对上面2.2.1节T-S模糊系统的一般定义, 设输入变量 $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 的第 k_j 个模糊子集的中心点位于 $C_{k_j}^j$, $k_j=1, 2, \dots, n_j$, 并且有 $0 \leq C_1^j \leq C_2^j \leq \dots \leq C_{n_j}^j \leq 1$ 。为了不失一般性, 我们设每个中心点处的隶属度为1。对每个输入变量 $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 定义模糊分割间距: $D_{k_j}^j = C_{k_j}^j - C_{k_j-1}^j$, $k_j=1, 2, \dots, n_j+1$, 其中 $C_0^j=0$, $C_{n_j+1}^j=1$ 。在此基础上可以对每一个输入变量 $x_j (j=1, 2, \dots, m)$ 定义最大模糊分割间距:

$$D_{\max}^j = \max_{k_j=1}^{n_j+1} D_{k_j}^j \quad (2-7)$$

在 $C^m[0,1]$ 上定义的 q 次 m 元多项式函数可以写为

$$P_q = \sum_{d_1=0}^{m_1} \sum_{d_2=0}^{m_2} \dots \sum_{d_m=0}^{m_m} \beta_{d_1 d_2 \dots d_m} x_1^{d_1} x_2^{d_2} \dots x_m^{d_m}, \text{ 其中 } \sum_{j=1}^m m_j = q, x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T。$$

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库